การศึกษาน้ำหนักบรรทุกวิกฤตของการโก่งเดาะสำหรับกระบอกไฮดรอลิกเนื่องจากแรงที่กระทำแบบอยู่กับที่จากหอคอยกังหันลมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

A Study of the Critical Buckling Load of the Hydraulic Cylinders Under the Effect of Static Loads from Wind Turbine Tower by Finite Element Method

ร้อยเอก ธนินทร์ ชื่นมาลัย[1,*] ร้อยเอก จิรวัฒน์ ยุทธประเวศน์[2] ร้อยเอก สมิทธิภัทร คำประพันธ์[3] และ Dr. Byungik Chang [4]

[1,2,3] กองวิชาวิศวกรรมโยธา ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จ.นครนายก

[4]Department of Civil and Environmental Engineering, University of New Haven, West Haven, Connecticut, 06516, USA.

**Corresponding author; E-mail address: thanin.ch@crma.ac.th*

บทคัดย่อ

การติดตั้งหอคอยกังหันลมสามารถใช้กระบอกไฮดรอลิกเพื่อช่วยในการติดตั้งและซ่อมบำรุงตามวงรอบการใช้งาน น้ำหนักบรรทุกวิกฤตเนื่องจากแรงที่กระทำแบบอยู่กับที่ของหอคอยกังหันลมส่งผลโดยตรงกับการโก่งเดาะของกระบอกไฮดรอลิก เพื่อศึกษาการโก่งเดาะของกระบอกไฮดรอลิกที่ถูกกระทำโดยน้ำหนักบรรทุกคงที่จากหอคอยกังหันลมระหว่างการใช้งานสามารถศึกษาได้จากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและวิเคราะห์การโก่งเดาะด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรม ANSYS® ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเมื่อความยาวของกระบอกไฮดรอลิกมีความชะลูดเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความเค้นของการโก่งเดาะของกระบอกจะลดลงตามลำดับ

คำสำคัญ: การโก่งเดาะ, กระบอกไฮดรอลิก, แรงที่กระทำแบบอยู่กับที่, หอคอยกังหันลม, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

The installation of a wind turbine tower can use hydraulic cylinders to facilitate installation and maintenance according to the lifecycle. The critical load due to static load from the wind turbine tower directly affects the buckling of hydraulic cylinders. To study the buckling of the hydraulic cylinders, which are applied by dead load from the wind turbine tower during operation can be studied from the relevant theory and the buckling that was analyzed by the Finite Element Method through ANSYS®. This study found that when the length of the hydraulic cylinders is increased, the buckling stress of the cylinders is decreased accordingly.

Keywords: Buckling, Hydraulic Cylinders, Dead Load, Wind Turbine Tower, Finite Element Method

1. คำนำ

จากการศึกษาน้ำหนักบรรทุกวิกฤตเนื่องจากแรงกระทำแบบอยู่กับที่สำหรับการโก่งเดาะของกระบอกไฮดรอลิกขณะติดตั้งหอคอยกังหันลมด้วยวิธีทางทฤษฎี พบว่าแรงตามแนวแกนที่กระทำกับกระบอกไฮดรอลิกภายใต้น้ำหนักบรรทุกของหอคอยกังหันลมนั้นส่งผลให้เกิดค่าความเค้นขึ้น ณ จุดวิกฤติของกระบอกไฮดรอลิก โดยจากผลการศึกษาทางทฤษฎีสามารถนำข้อมูลขั้นต้นมาใช้วิเคราะห์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกระบอกไฮดรอลิกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยวิธีการสร้างแบบจำลองกระบอกไฮดรอลิกเพื่อเป็นข้อพิจารณาก่อนนำไปกำหนดแนวทางการติดตั้งหอคอยกังหันลม

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการโก่งเดาะของกระบอกไฮดรอลิกที่ถูกกระทำโดยน้ำหนักบรรทุกคงที่จากหอคอยกังหันลมระหว่างการติดตั้งจากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและสามารถสร้างแบบจำลองกระบอกไฮดรอลิกเพื่อศึกษาความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่ส่งผลให้เกิดการโก่งเดาะของกระบอกไฮดรอลิกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 การโก่งเดาะของกระบอกไฮดรอลิก

การโก่งเดาะ (Buckling) เป็นสภาวะขีดจำกัดของการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างหรือของชิ้นส่วนภายใต้แรงกระทำวิกฤติในช่วงเชิงเส้นการโก่งเดาะเป็นการวิบัติของโครงสร้างที่ชะลูด (Slenderness) ซึ่งเป็นการวิบัติเนื่องจากการโก่งตัวของโครงสร้างที่มีความชะลูดทำให้ขาดความสามารถในการรับแรงกระทำโดยโครงสร้างที่มีความชะลูดอาจจะเสียหายก่อนถึงจุดวิบัติการคราก (Yielding Point) ของโลหะ ซึ่งการโก่งเดาะสามารถแบ่งตามลักษณะได้แก่ การโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local Buckling), การโก่งเดาะเฉือน (Shear Buckling), การโก่งเดาะนอกระนาบ (Out-of-Plane Buckling), การโก่งเดาะแบบดัด (Flexural Buckling), การโก่งเดาะแบบดัดและบิด (Flexural

Torsional Buckling), การโก่งเดาะทางด้านข้าง (Lateral Buckling), การโก่งเดาะทางข้างและการบิด (Lateral-Torsional Buckling), การโก่งเดาะบิด (Torsional Buckling)

ดังนั้นการโก่งเดาะ (Buckling) จึงเป็นหนึ่งในข้อกำหนดที่สำคัญสำหรับกระบอกสูบไฮดรอลิก โดยสมการของการโก่งตัวเดาะในช่วงยืดหยุ่น (Elastic) ของวัสดุที่กำหนดโดย Leonhard Euler ในปี 1744 [1] หลักการของออยเลอร์ (Euler's Method) เหมาะสำหรับโครงที่มีความชะลูด (Slenderness) โดยวิธีการของออยเลอร์แสดงให้เห็นถึงการคำนวณแรงวิกฤติ (Critical Load) สำหรับพฤติกรรมของโครงสร้างในช่วงเชิงเส้น (Linear Stage) ของวัสดุ ซึ่งเป็นวิธีการเชิงประจักษ์เชิงทฤษฎีและเชิงทดลองหลายวิธีได้รับการพัฒนาเพื่อพิสูจน์และพัฒนาทฤษฎีจากการทดลองของออยเลอร์ [2] แสดงดังสมการที่ 1 ถึง 4 ตามลำดับ

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{KL}{r} \quad (3)$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (4)$$

เมื่อ P_{cr} คือแรงกระทำวิกฤติ หรือ Euler Load

E คืออิลาสติกโมดูลัสของเหล็ก (Modulus of Elasticity)

I คือโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia)

K คือค่าสัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิผล (Effective Length Factor)

KL คือความยาวประสิทธิผล (Effective Length)

σ_{cr} คือความเค้นจากการโก่งเดาะ (Buckling Stress)

KL/r คืออัตราส่วนความชะลูดประสิทธิผล (Effective Slenderness Ratio)

λ คืออัตราส่วนความชะลูด Slenderness Ratio

r คือรัศมีไจเรชัน Radius of Gyration

A คือพื้นที่หน้าตัด

3.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การสร้างแบบจำลองกระบอกไฮดรอลิกเนื่องจากแรงที่กระทำแบบอยู่กับที่ขณะติดตั้งหอคอยกังหันลมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นการวิเคราะห์ภายใต้แนวทางการออกแบบของ IEC 61400-1 [3] ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลที่เป็นข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับการออกแบบและติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังลม (Wind Turbines) มาตรฐานนี้รวมถึงการออกแบบส่วนประกอบและการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังลม การวัดและควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังลมในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันไป เช่น พื้นที่ที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังลม ความสูงของโครงสร้างที่ใช้ในการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังลม

โดยมาตรฐาน IEC 61400-1 นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้มีการออกแบบและติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังลมที่มีความปลอดภัยและประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งเป็นการจัดเตรียมพื้นฐานในการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังลมในอนาคต มาตรฐานนี้จะแบ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังลมออกเป็นส่วนประกอบหลัก ได้แก่ เสา (Tower) บรรจุสารลม (Rotor) ตัวแปรผันแปร (Generator) รวมถึงระบบควบคุมและจัดการ

3.2.1 การสร้างตาข่าย (Mesh) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การศึกษาทางกลศาสตร์ได้รับการพัฒนาโดยใช้แบบจำลองแบบเชิงตัวเลขเพื่อพัฒนาและการประเมินการออกแบบ [4] การสร้างตาข่าย (Mesh) สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นการแบ่งขอบเขตทางกายภาพ โดยการสร้าง Mesh เป็นขั้นตอนสำคัญของกระบวนการที่จะเกิดขึ้นสำหรับการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลขด้วยรูปทรงที่ซับซ้อน ที่ส่งผลต่อความแม่นยำและความเร็วของการจำลอง เนื่องจากโดยทั่วไปการ Mesh จะใช้เวลาส่วนที่จำเป็นในการวิเคราะห์ผลลัพธ์จากคำนวณ ความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง และความถูกต้องของผลลัพธ์ประกอบด้วยการปรับแต่ง Mesh หลังจากคำนวณตัวเลขด้วยการสร้าง Mesh ครั้งแรก กระบวนการปรับแต่ง Mesh จะเริ่มปรับปรุงผลลัพธ์ โดยทั่วไปการปรับแต่ง Mesh เป็นวิธีการแก้ไขโมเดลด้วย Mesh ที่ละเอียดกว่าตามลำดับ โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของความละเอียดต่าง ๆ การเปรียบเทียบนี้สามารถตรวจสอบได้โดยการเปรียบเทียบข้อมูลจากทฤษฎีหรือจากการทดลองซึ่ง Shiao and Chamis ได้นำเสนอ วิธีการสร้าง Mapped Mesh เพื่อปรับปรุงความถูกต้องและประสิทธิภาพของผลลัพธ์ และสามารถสร้าง Mesh ลักษณะหกเหลี่ยมในรูปทรงที่ซับซ้อนของการการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ จากการศึกษาได้เสนอแนะนำให้สร้าง Mesh ด้วยรูปทรงเรขาคณิตทั้งหมดด้วย Mesh แบบหยาบ จากนั้นสร้าง Mesh ที่ละเอียดกว่ารอบ ๆ จุดเฉพาะเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำด้วยจำนวน Node ที่หนาแน่นขึ้น [5] นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาแน่นของ Mesh ระหว่างพื้นที่สัมผัสส่งผลต่อผลลัพธ์ที่เชื่อถือได้ของการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขโดยตรง [6]

เพื่อให้การวิเคราะห์การโก่งเดาะสำหรับกระบอกไฮดรอลิกเนื่องจากแรงที่กระทำแบบอยู่กับที่จากหอคอยกังหันลมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การศึกษานี้เลือกใช้ Mesh ที่มีขนาดองค์ประกอบประมาณ 1 มิลลิเมตร สำหรับการกำหนดค่าทั้งหมด [7] ความหนาแน่นและขนาดของ Mesh ที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญในการกำหนดความถูกต้องของแบบจำลอง และการปรับแต่งความหนาแน่นของ Mesh ในบริเวณที่ต้องการผลลัพธ์ในการวิเคราะห์จะช่วยเพิ่มผลลัพธ์ที่เชื่อถือได้สำหรับการศึกษาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [8]

3.2.2 การศึกษาพฤติกรรมของวัสดุโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การศึกษาการโก่งเดาะของกระบอกไฮดรอลิกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ การวิเคราะห์ในช่วงพฤติกรรมของวัสดุในช่วง Linear และ Non-linear โดยการวิเคราะห์ทั้งสองช่วงนี้จะต้องตั้งค่าตัวอย่าง แบบจำลอง, วัสดุ, และการสร้างตาข่าย (Mesh) ในการตั้งค่าวิเคราะห์ การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ANSYS® สามารถนำไปใช้ได้กับโครงสร้างหลากหลายชนิด จากตัวอย่างงานวิจัยในเรื่องการคำนวณหาความเค้นสัมผัส (Contact Stress) ระหว่างคานสะพานเหล็กรูปตัว I-Girder กับลูกกลิ้ง (Roller) ที่ช่วยในการติดตั้งสะพานได้ใช้การจำลองตัวอย่างโครงสร้างสะพานและลูกกลิ้งในโปรแกรม ANSYS® เพื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นสัมผัส (Contact Stress) ระหว่างทฤษฎีกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และสามารถนำผลการเปรียบเทียบมาพัฒนาเพื่อสร้างกราฟ Nomogram เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับโครงสร้างสะพานที่หลากหลายมากขึ้น โดยจากงานวิจัยที่ศึกษาจะเห็นได้ว่ารูปแบบตาข่าย (Mesh Style) และขนาดของตาข่าย (Mesh sizing) มีความสำคัญต่อผลการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข [9]

4. การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยและตั้งสมมติฐานของการวิเคราะห์หาค่าความเค้นการโก่งเดาะ (Buckling Stress) ของแบบจำลองกระบอกไฮดรอลิกจำนวน 2 กระบอกที่ติดตั้งกับหอคอยกังหันลม จะเป็นวิธีการหลักในการดำเนินการศึกษาและวิจัยในครั้งนี้ เนื่องจากความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกวิกฤตของการโก่งเดาะ (Critical Buckling Load) เป็นคุณสมบัติหลักที่สำคัญที่สุดของการวัดความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจากหอคอยกังหันลม โดยการศึกษานี้สร้างแบบจำลองกระบอกไฮดรอลิกจำนวน 1 กระบอกโดยรับน้ำหนักบรรทุกครึ่งหนึ่งของน้ำหนักจากหอคอยกังหันลมที่กระทำตามแนวแกนขณะกระบอกไฮดรอลิก

สำหรับติดตั้งหอคอยกังหันลมเพื่อเปรียบเทียบความเค้นและความเค้นที่สามารถรองรับการการโก่งเดาะของแบบจำลองที่นำข้อมูลจากกรณีศึกษาจากงานก่อสร้างของ Star Wind Turbines LLC [10] ซึ่งการวิเคราะห์ความสามารถที่รองรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ ของกระบอกไฮดรอลิกเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ของหอคอยกังหันลม ที่จะถูกจำลองเป็นโมเดล 3 มิติด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถเป็นแนวทางในการคำนวนหาค่าความเค้นและความเค้นจากการติดตั้งหอคอยกังหันลม โดยผลลัพธ์จากการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการกำหนดแนวทางหาจุดวิกฤติของการรับน้ำหนักบรรทุกระหว่างการติดตั้งหอคอยกังหันลม และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการติดตั้งหอคอยกังหันลมลักษณะหรือรูปแบบอื่นๆ ที่มีขนาดและน้ำหนักบรรทุกที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้การศึกษาการโก่งเดาะของกระบอกไฮดรอลิกเนื่องจากแรงที่กระทำแบบอยู่กับที่จากหอคอยกังหันลมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำข้อมูลของมุมยกของกระบอกไฮดรอลิกขณะติดตั้งหอคอยกังหันลมที่มุมต่างๆ ที่ส่งผลให้เกิดแรงอัดตามแนวแกนที่กระทำกับกระบอกไฮดรอลิกน้อยที่สุดมาใช้เป็นแนวทางการออกแบบการติดตั้ง

4.1 แบบจำลองหอคอยกังหันลม

จากรูปที่ 1 แบบจำลองหอคอยกังหันลมในส่วนของโครงสร้างหอคอยกังหันลม (Wind Tower) และส่วนประกอบ (Component) ที่ใช้สำหรับติดตั้งใบพัดที่ใช้ในการคำนวณน้ำหนักบรรทุกคงที่รวมของหอคอยกังหันลมสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองกังหันลมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 1 หอคอยกังหันลม

4.2 ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับหอกังหันลม

ตารางที่ 1 นำเสนอข้อกำหนดทางเทคนิคขั้นต้นของหอคอยกังหันลมที่ใช้เป็นแบบจำลองหอคอยกังหันลมสำหรับการศึกษาน้ำหนักบรรทุกวิกฤตของการโก่งเดาะสำหรับกระบอกไฮดรอลิกเนื่องจากแรงที่กระทำแบบอยู่กับที่จากหอคอยกังหันลมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ STAR 74-6 ซึ่งออกแบบโดย Star Wind Turbines LLC โดยจากตารางที่ 1 ได้ระบุลักษณะสำคัญและข้อกำหนดทางเทคนิคของกังหันลม STAR 74-6 [10] ที่ใช้เป็นข้อมูลสำหรับการศึกษาทางทฤษฎีและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดทางเทคนิค STAR 74-6

Data Description	Magnitude
Model	STAR 74-6, 24-45 kW
Rotor Diameter	74 ft (23 mts)
Number of Blades	6
Peak Power	24-45 kW @ 15.4 MPH
Swept Area	4,467 ft^2 (415 m^2)
Rated Rotation	36-40 RPM
Survival Wind Speed	120 MPH (53.6 m/s)
Sound	42 dBA @200 ft
Energy Production	110,000 kWh

น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) รวมของหอคอยกังหันลมที่มีพื้นที่หน้าตัดของรูปหลายเหลี่ยมจำนวน 19 ด้าน โดยเทียบเท่ากับ 97.45 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่วงกลม ซึ่งประมาณการคำนวณปริมาตรและน้ำหนักรวมของหอคอยกังหันลมโดยใช้ทฤษฎีของ Vieta's Formula [11] โดยน้ำหนักบรรทุกคงที่รวมของหอคอยกังหันลมขณะเริ่มติดตั้ง (Total Dead Load of Wind Tower) มีค่าเท่ากับ 104.34 kN

4.3 การวิเคราะห์แบบจำลองกระบอกไฮดรอลิกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

งานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองกระบอกไฮดรอลิกเพียง 1 กระบอกสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งน้ำหนักบรรทุกคงที่ทั้งหมดของหอคอยกังหันลมมีค่าเท่ากับ 104.34 kN จากตารางที่ 2 โดยแบ่งน้ำหนักบรรทุกคงที่ทั้งหมดสำหรับการวิเคราะห์หอคอยกังหันลมเป็นสองส่วนตามจำนวนกระบอกไฮดรอลิกที่รองรับ จำนวน 2 กระบอก ดังนั้น น้ำหนักบรรทุกที่จะใช้ในการวิเคราะห์ต่อกระบอกไฮดรอลิก 1 กระบอกมีค่าเท่ากับ 52.164 kN

4.3.1 น้ำหนักรวมของหอคอยกังหันลม

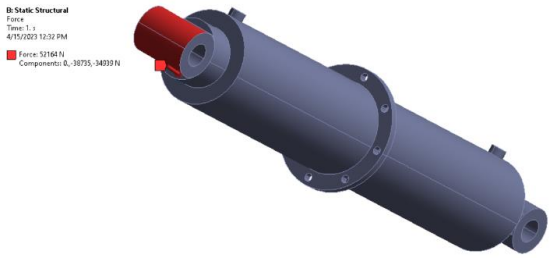
จากกรณีศึกษาของ Star Wind Turbines LLC น้ำหนักบรรทุกที่กระบอกไฮดรอลิกรองรับก่อนติดตั้งหอคอยกังหันลมระบุในตารางที่ 1 ประกอบด้วย ใบพัดจำนวนหกใบและดุมยึดใบพัดแทนด้วยสัญลักษณ์ A (6 Blades & Hub (A)) มีน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 19.92 kN เครื่องกำเนิดไฟฟ้ารวมแทนด้วยสัญลักษณ์ B (Total Generator (B)) มีน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 18.34 kN ฐานทั้งหมดแทนด้วยสัญลักษณ์ C (Total Base (C)) มีน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 4.57 kN โดยน้ำหนักบรรทุกคงที่รวมของอุปกรณ์ที่ติดตั้งเข้ากับหอคอยกังหันลมทั้งหมด (Total W_{A+B+C}) มีน้ำหนักบรรทุกรวมเท่ากับ 42.83 kN และน้ำหนักของหอคอยทั้งหมด (Total Tower) น้ำหนักบรรทุกที่ 61.5 kN ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกที่กระบอกไฮดรอลิกจำนวน 2 กระบอกรองรับก่อนติดตั้งหอคอยกังหันเท่ากับ 104.33 kN

ตารางที่ 2 น้ำหนักรวมของหอคอยกังหันลม

Component	Weight (kN)	Force (

4.3.2 น้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับกระบอกไฮดรอลิก

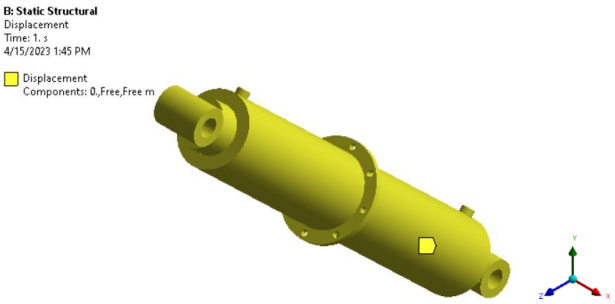
จากรูปที่ 2 ระบุค่าน้ำหนักบรรทุกคงที่จากหอคอยกังหันลมที่กระทำกับกระบอกไฮดรอลิก 1 กระบอกมีค่าเท่ากับ 52.16 kN โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 2 น้ำหนักบรรทุกคงที่จากหอคอยกังหันลมที่กระทำกับกระบอกไฮดรอลิก

4.3.3 Boundary Condition ของกระบอกไฮดรอลิก

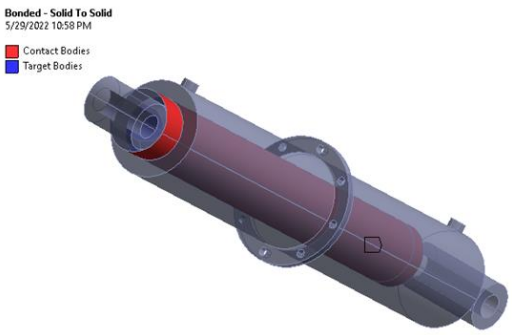
รูปที่ 3 การตั้งค่าสำหรับ Boundary Condition กระบอกไฮดรอลิกในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะกำหนดให้กระบอกไฮดรอลิกไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในทิศทาง X เพื่อศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติขณะรองรับน้ำหนักบรรทุกคงที่จากหอคอยกังหันลม



รูปที่ 3 Boundary Condition ของกระบอกไฮดรอลิก

4.3.4 พฤติกรรมบริเวณผิวสัมผัสแบบเชิงเส้น

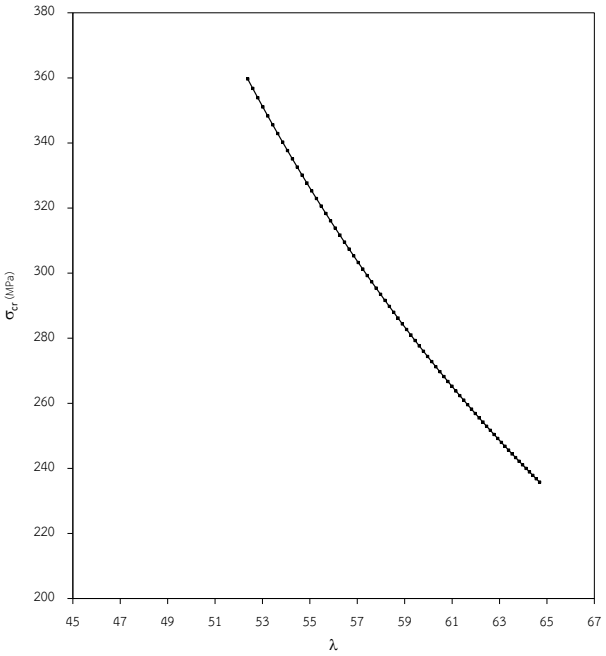
รูปที่ 4 แสดงการตั้งค่าผิวสัมผัส (Contact) ระหว่างผิวสัมผัสของกระบอกสูบและก้านสูบไฮดรอลิก ซึ่งเป็นการตั้งค่าเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมบริเวณผิวสัมผัสของวัสดุแบบเชิงเส้น (Linear Stage)



รูปที่ 4 การตั้งค่าผิวสัมผัส (Contact)

5. ผลการวิจัย

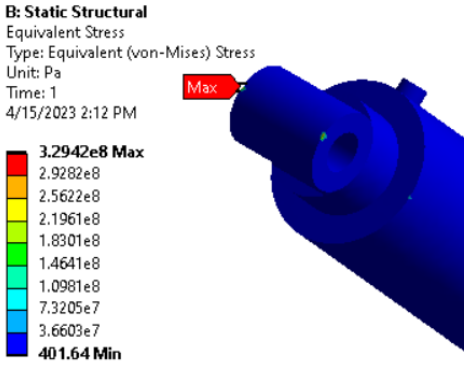
ความเค้นจากการโก่งเดาะของก้านสูบไฮดรอลิกสามารถคำนวณโดยแรงกระทำวิกฤติ (P_{cr}) หารด้วยพื้นที่หน้าตัดของก้านสูบเมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นจากการโก่งเดาะและอัตราส่วนความชะลูดของก้านสูบ รูปที่ 5 ที่แสดงความสัมพันธ์ความเค้นจากการโก่งเดาะ (σ_{cr}) และอัตราส่วนความชะลูด (λ) การศึกษาทางทฤษฎีพบว่าค่าความเค้นจากการโก่งเดาะ (σ_{cr}) คำนวณจากสมการที่ (2) แปรผกผันกับอัตราส่วนความชะลูด (λ) จากสมการที่ (3) ของแกนกระบอกไฮดรอลิกขณะติดตั้งหอคอย จากการคำนวณค่าทางทฤษฎีพบว่าค่าความเค้นจากการโก่งเดาะ (σ_{cr}) สูงสุดเท่ากับ 360 MPa โดยกระบอกไฮดรอลิกมีความชะลูด (λ) เท่ากับ 52.37 และค่าความเค้นจากการโก่งเดาะ (σ_{cr}) ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 235 MPa โดยกระบอกไฮดรอลิกมีความชะลูด (λ) เท่ากับ 64.68 ตามลำดับ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ความเค้นจากการโก่งเดาะและอัตราส่วนความชะลูด

5.1 Equivalent (von-Mises) Stress

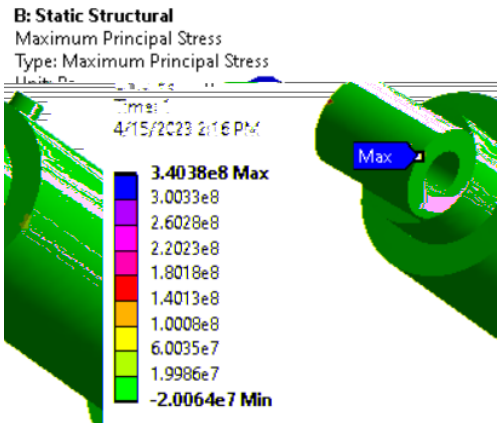
จากรูปที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์ค่า Equivalent (von-Mises) Stress ของกระบอกไอดรอลิกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกคงที่จากหอคอยกังหันลมโดยจากผลการวิเคราะห์พบว่าค่า Maximum Equivalent (von-Mises) Stress มีค่าเท่ากับ 329.42 MPa และเมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นจากการโก่งเดาะ (σ_{cr}) ทางทฤษฎีจากรูปที่ 5 ที่แสดงความสัมพันธ์ความเค้นจากการโก่งเดาะ (σ_{cr}) และอัตราส่วนความชะลูด (λ) ซึ่งจากรูปที่ 5 พบว่าค่าความชะลูด (λ)ของกระบอกไฮดรอลิกมีค่าเท่ากับ 52.37



รูปที่ 6 Equivalent (von-Mises) Stress ของกระบอกไฮดรอลิก

5.2 Principal Stress

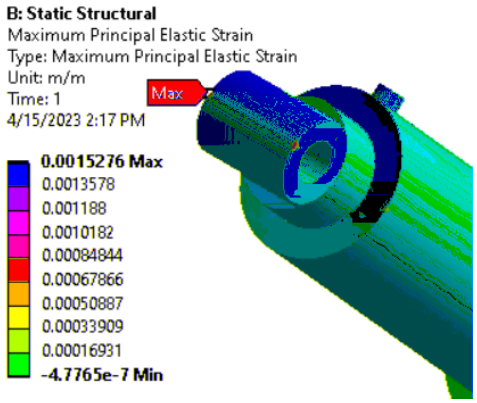
จากภาพผลการวิเคราะห์กระบอกไอดรอลิกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นสูงสุด (Maximum Principal Stress) เท่ากับ 340 MPa แสดงดังรูปที่ 7 เมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นจากการโก่งเดาะ (σ_{cr}) ทางทฤษฎีจากรูปที่ 5 ที่แสดงความสัมพันธ์ความเค้นจากการโก่งเดาะและอัตราส่วนความชะลูด (λ) พบว่าค่าความชะลูด (λ) ของกระบอกไฮดรอลิกมีค่าเท่ากับ 53.8



รูปที่ 7 Principal Stress ของกระบอกไฮดรอลิก

5.3 Principal Elastic Strain

จากผลการวิเคราะห์กระบอกไอดรอลิกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าค่าความเครียดสูงสุด (Maximum Principal Elastic Strain) กระบอกไฮดรอลิกมีค่าเท่ากับ 0.0015276 แสดงรูปที่ 8 เมื่อกระบอกไฮดรอลิกรองรับน้ำหนักบรรทุกจากหอคอยกังหันลมซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ได้จาก Star Wind Turbines LLC Company ประเทศสหรัฐอเมริกา [9]



รูปที่ 8 Principal Elastic Strain ของกระบอกไฮดรอลิก

จากกรณีศึกษาการโก่งเดาะของกระบอกไฮดรอลิกที่ถูกกระทำโดยน้ำหนักบรรทุกคงที่จากหอคอยกังหันลมระหว่างการใช้งานสามารถศึกษาได้จากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากกรณีศึกษาขณะติดตั้งหอคอยกังหันลมของ LLC Star Wind Turbines [9] ของกระบอกไฮดรอลิกที่รองรับน้ำหนักบรรทุกคงที่จากหอคอยกังหันลม โดยมีค่าความเค้นสูงสุดทางทฤษฎีเท่ากับ 360 MPa และค่าความเค้นจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เท่ากับ 340 MPa โดยจากผลการศึกษาพบว่าความเค้นที่กระทำต่อกระบอกไฮดรอลิกจะลดลงเมื่อกระบอกสูบมีอัตราส่วนความชะลูดเพิ่มขึ้น และเมื่อความยาวของกระบอกไฮดรอลิกมีความชะลูดเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความเค้นของการโก่งเดาะของกระบอกไฮดรอลิกจะลดลงตามลำดับ

6. บทสรุป

จากการศึกษาน้ำหนักบรรทุกวิกฤตสำหรับการโก่งเดาะของกระบอกไฮดรอลิกภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่ของหอคอยกังหันลมด้วยวิธีทางทฤษฎีพบว่า เมื่อกระบอกไฮดรอลิกรองรับน้ำหนักบรรทุกจากน้ำหนักของหอคอยกังหันลมในมุมที่แตกต่างกันระหว่างการติดตั้งด้วยชุดกระบอกไฮดรอลิกเข้ากับหอคอยกังหันลมโดยยึดด้วยจุดยึดหมุน จะมีค่าความเค้นของการโก่งเดาะเกิดขึ้นที่ก้านสูบระหว่างการติดตั้งหอคอยกังหันลม และขณะติดตั้งหอคอยกังหันลมเมื่อความยาวของกระบอกไฮดรอลิกมีความชะลูดเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความเค้นของการโก่งเดาะของกระบอกจะลดลงตามลำดับ โดยจากผลการศึกษาทางทฤษฎีและการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถนำผลการศึกษาขั้นต้นมาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกระบอกไฮดรอลิกขณะรองรับน้ำหนักบรรทุก และเป็นข้อพิจารณาก่อนนำไปกำหนดแนวทางการติดตั้งหอคอยกังหันลมด้วยชุดกระบอกไฮดรอลิกซึ่งเป็นอีกหนึ่งแนวทางในการผลิตพลังงานทางเลือกต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำโครงการวิจัยขอขอบคุณกองทุนพัฒนาโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าที่ได้สนับสนุนเงินทุนในการวิจัย รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านจากกองวิชาวิศวกรรมโยธา ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า และเจ้าหน้าที่กองทุนพัฒนาโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าทุกท่านที่ได้ช่วยเหลือให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] Riks, E. (2017). Buckling. Encyclopedia of Computational Mechanics Second Edition, 1-29.

[2] E. Narvydas. (2016). Buckling strength of hydraulic cylinders-an engineering approach and finite element analysis. *Mechanika*, 22, pp. 474-477.

[3] International Standard IEC 61400-1. (2005). *Wind Turbine*. International Electrotechnical Commission, 3, 311, CH-1211 Geneva 20, Switzerland.

[4] Yeh, M.K. and Wang, C.H. (2017). Stress analysis of composite wind turbine blade by finite element method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 241.

[5] Shiao, M.C. and Chamis, C.C. (1992). Mapping Methods for computationally efficient and accurate structural reliability. *Structural Dynamics and Materials Conference*. NASA Technical Memorandum. Dallas, Texas.

[6] Sladkowski, A. and Sitarz, A. (2003). Analysis of wheel–rail interaction using FE software. *ELSEVIER*, pp. 1217-1223.

[7] Srivastava, J. P., Sarkar, P. K., and Ranjan, V. (2014). Contact stress analysis in wheel rail by Hertzian method and finite element method. *Springer Nature*, 95, pp. 319–325.

[8] Shepherd, J.F. and Johnson, C.R. (2016). Hexahedral mesh generation constraints. *Springer Nature*, pp. 195–213.

[9] Chanmalai, T., Byungik, C., Hagos, S., and Thippesh B.H. (2021). Development of a nomogram to predict the contact stress between an I-girder and a support roller. *Engineering Solid Mechanics*,9, pp. 347-462.

[10] LLC Star Wind Turbines. (2020). *Datasheet STAR 74-6 24-45 Kw*. Vermont. East Dorset.

[11] Viète, F. (1994). *Encyclopedia of Mathematics.* EMS Press, 6-10.